

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА АВИАЦИОННЫХ ИНДУКТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А. Д. СЕРЕБРЯКОВ

*Институт транспорта и связи  
Ломоносова, 1, LV – 1019, Рига, Латвия*

Получено аналитическое выражение для определения воздушного зазора аксиального индукторного генератора. Рассмотрена методика учёта реакции якоря.

Analytical expression for definition of the air-gap of the axial inductor generator is obtained. The procedure of the account of reaction of an anchor is considered.

**Keywords:** *inductor generator, anchor reaction, air-gap*

Индукторные электрические машины (ИЭМ) нашли достаточно широкое применение в железнодорожном и автомобильном транспорте в качестве генераторов, а также в различных отраслях техники в виде электромашинных преобразователей для сварки, индукционного нагрева и других целей.

В авиации впервые индукторные генераторы мощностью 2 кВт и частотой 1000 Гц, разработанные В. П. Вологдиным в 1912 г., были применены для питания радиостанции на самолёте «Илья Муромец». В дальнейшем они нашли применение в качестве однопакетных аксиальных генераторов в электромашинных преобразователях типа МА мощностью от 100 до 1500 В · А (МА – 100; 250; 500; 1500).

Для авиации наиболее перспективными качествами ИЭМ являются их конструктивная простота и высокая надёжность, а сдерживающим фактором – большее, чем в обычных синхронных машинах, значение удельной массы.

Однако, во-первых, в настоящее время традиционный критерий уровня бортового оборудования – его масса – отступает на второй план, поскольку его сокращение уже не даёт существенного экономического эффекта. На первый план выступают необходимость повышения общей безопасности полётов и сокращение эксплуатационных расходов.

Таким образом, вес агрегата не является доминирующим фактором, определяющим возможность применения агрегата в авиации; основным фактором выступает его надёжность.

Во-вторых, работа над совершенствованием ИЭМ позволила уменьшить удельную массу и приблизить её к значениям применяемых электрических машин / 1 /.

Эти обстоятельства позволяют говорить о возможности применения ИЭМ в авиации в качестве генераторов, различных двигателей, сельсинов и т.д. / 2 / и на этой основе повышать эффективность эксплуатации и технического обслуживания бортового оборудования.

Индукторная машина имеет зубчатую структуру пакетов статора и ротора – чередование зубцов и впадин (пазов), что и определяет изменение магнитной проводимости воздушного зазора между ними, пульсацию магнитного потока и наведение ЭДС в обмотке якоря. Такая компоновка определяет некоторые особенности реакции якоря в ИЭМ по сравнению с обычной явнополюсной синхронной машиной и соответствующие особенности учёта реакции якоря при расчёте машин и, в частности, при определении воздушного зазора.

В системе электроснабжения воздушных судов генераторы переменного тока работают при активно – индуктивной нагрузке ( $\cos(\varphi_n) = 0.8 \dots 0.85$ ). В этом случае имеет место как продольная, так и поперечная реакция якоря. Продольная реакция якоря вызывает значительное уменьшение индукции под зубцом и увеличение индукции под пазом ротора. Поперечная реакция якоря вызывает значительное искажение формы кривой поля / 3 /. Это обуславливает изменение гармонического состава магнитного потока в зубцах, изменение соотношения между постоянными и гармоническими составляющими магнитных потоков, а также проявляется в изменении и смещении их максимумов от начала отсчёта углов поворота ротора.

Результирующее магнитное поле на участке зубцового шага ротора  $t_{ZR}$  распределяется неравномерно и имеет резко выраженный пик между продольной  $d$  и поперечной  $q$  осями машины

(см. / 3 /, стр. 134, рис. 4.13, в). Амплитуда пика превышает в три и более раз амплитуду первой гармонической составляющей магнитной индукции. Это может вызывать дополнительное насыщение магнитной цепи. Поэтому кроме обычного учёта реакции якоря, осуществляемого в явнополюсных синхронных машинах путём включения в МДС возбуждения эквивалентных значений МДС реакции якоря, необходимо в ИЭМ выполнять ещё проверку на возможность насыщения зубцов статора и ротора из-за влияния реакции якоря.

Приведенные к обмотке возбуждения составляющие МДС реакции якоря  $F_{ad}$  и  $F_{aq}$  определяются следующим образом:

$$F_{ad} = K_d \cdot F_{d1}; F_{aq} = K_q \cdot F_{q1}, \quad (1)$$

где  $K_d, K_q$  – коэффициенты приведения, причём для индукторной машины они рассчитываются через проводимости воздушного зазора;  $F_{d1}; F_{q1}$  – первые гармонические МДС реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ , которые могут быть определены как

$$F_{d1} = F_{a1} \cdot \sin(\Psi); F_{q1} = F_{a1} \cdot \cos(\Psi). \quad (2)$$

Здесь  $\Psi$  – угол сдвига по фазе между ЭДС холостого хода  $E_0$  и током якоря  $I$ ;  $F_{a1}$  – МДС обмотки якоря по первой гармонической, которая для трёхфазных одноимённо- или разноимённополюсных генераторов может быть определена в соответствии с выражением

$$F_{a1} = 1.35 \cdot I_1 \cdot W_\phi \cdot \frac{K_\omega}{Z_r}, \quad (3)$$

где  $W_\phi$  – число витков в фазе обмотки якоря;  $K_\omega$  – обмоточный коэффициент по первой гармонической;  $Z_r$  – число зубцов ротора;  $I_1$  – действующее значение тока якоря первой гармоники.

Значение  $\sin(\Psi)$  может быть определено как

$$\sin(\Psi) = \frac{X_c}{\sqrt{(R_{a\text{нр}} + R_{\text{нр}})^2 + X_c^2}}, \quad (4)$$

где  $R_a, X_c$  – активное и синхронное сопротивления обмотки якоря;  $R_{\text{нр}}$  – сопротивление нагрузки.

Учёт размагничивающего действия реакции якоря может быть также осуществлён с помощью коэффициента увеличения потока и ЭДС при нагрузке

$$K_E = \frac{\sqrt{(R_a + R_{\text{нр}})^2 + X_c^2}}{R_a + R_{\text{нр}}} \quad \text{или} \quad K_E = \frac{\sqrt{U_{\text{фр}}^2 + (I_1 \cdot X_c)^2}}{U_{\text{фр}}} \quad (5)$$

где  $U_{\text{фр}}$  – расчётное фазное напряжение обмотки якоря.

В этом случае необходимая МДС возбуждения

$$F_B = n_\delta \cdot K_E \cdot F_{\delta_3}, \quad (6)$$

где  $n_\delta$  – число последовательно включенных воздушных зазоров на пути потока возбуждения;  $F_{\delta_3}$  – МДС эквивалентного воздушного зазора  $\delta_3$ .

Значением  $\delta_3$  обычно задаются в начале расчёта, принимая его ориентировочно равным  $\delta_3 = (1.2 \dots 1.5) \cdot \delta$ , причём  $\delta$  – реальный воздушный зазор, его увеличением до  $\delta_3$  учитывается МДС стали.

Значение  $\delta_3$  учитывается и при расчёте магнитных проводимостей полюсных выступов статора: удельная проводимость зазора  $\lambda_\delta = \frac{b_{z\delta}}{\delta_3}$ , а при определении проводимостей пазов

используется отношение  $\frac{b_{\text{пс}}}{\delta_3}$  ( $b_{z\delta}, b_{\text{пс}}$  – ширина зубца и паза статора).

Затем в ходе расчёта магнитной цепи величина  $\delta_3$  подвергается проверке, при которой:

а) определяется удельная МДС воздушного зазора (то есть МДС на 1 мм воздушного зазора)

$$F_{\delta 1} = \frac{B_\delta \cdot \delta_1}{\mu_0}, \quad (7)$$

причём  $B_{\delta}$  – индукция в воздушном зазоре, Тл;  $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  м – воздушный зазор в 1 мм;  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

б) затем оценивается значение дополнительного расчётного зазора  $\Delta\delta = \delta_3 - \delta$  по выражению

$$\Delta\delta = \frac{F_z}{F_{\delta 1}}, \quad (8)$$

где  $F_z$  – МДС зубцов статора и ротора, который и сравнивается с принятым;

в) реальный воздушный зазор

$$\delta = \frac{\delta_3 \cdot (F_{\delta 3} - F_z)}{F_{\delta 3}}, \quad (9)$$

$$\text{где } F_{\delta 3} = \frac{B_{\delta} \cdot \delta_3}{\mu_0}. \quad (10)$$

При выборе значения магнитной индукции  $B_{\delta}$  для ИЭМ исходят обычно из допустимого значения индукции в зубцах якоря  $B_{zs}$ . Это связано с тем, что насыщение зубцов якоря уменьшает модуляцию магнитного потока, а следовательно, его использование. Величина  $B_{zs}$  с повышением частоты снижается из-за вытеснения потока в стали и высоких удельных потерь.

Значения  $B_{\delta}$  и  $B_{zs}$  связаны соотношением

$$B_{zs} = \frac{(1.05 \dots 1.1) \cdot B_{\delta} \cdot b_{zr}}{b_{zs} \cdot K_{CT}}, \quad (11)$$

где  $b_{zr}$ ,  $b_{zs}$  – ширина зубцов ротора и статора;  $K_{CT}$  – коэффициент заполнения пакетов сталью.

Для выбора машины с меньшей степенью влияния реакции якоря целесообразно:

а) вначале увеличить индукцию в воздушном зазоре при холостом ходе  $B_{\delta 0}$ , что при заданной ЭДС обусловит уменьшение числа витков обмотки якоря, и следовательно, её индуктивное сопротивление; после определения коэффициента  $K_E$  (5) индукция в зазоре при нагрузке будет примерно равна

$$B_{zs} = \frac{B_{\delta}}{K_{CT} \cdot K_E}; \quad (12)$$

б) во втором случае, выбрав вначале значение  $B_{\delta} < B_{\delta 0}$  и произведя расчёт магнитной цепи, определяем коэффициент  $K_E$  (5) и затем индукцию в зубцах статора

$$B_{zs} = \frac{B_{\delta} \cdot K_E}{K_{CT}}. \quad (13)$$

Сравнивая оба результата, выбираем тот, который обеспечивает меньшее значение индукции в зубце при нагрузке, то есть меньшее насыщение зубцов, являющихся «узким» местом в магнитной цепи ИЭМ.

Влияние насыщения магнитной цепи ИЭМ может быть учтено соответствующим расчётом значений коэффициентов постоянной и гармонических составляющих магнитной проводимости полюсных выступов / 1 /.

Независимо от выбранной методики учёта реакции якоря и насыщения зубцов необходимо осуществлять проверку по предельно-допустимому влиянию реакции якоря на насыщение магнитной цепи ИЭМ. Критерием допустимости этого влияния служит коэффициент  $K_a$ , равный отношению максимальной МДС обмотки якоря  $F_{a,max}$  к МДС возбуждения  $F_{B\delta}$ , необходимой для проведения магнитного потока через воздушные зазоры (то есть без учёта влияния МДС якоря):

$$K_a = \frac{F_{a,max}}{F_{B\delta}}. \quad (14)$$

Значения  $F_{a,max}$  и  $F_{B\delta}$  могут быть определены как

$$F_{a,max} = \sqrt{m} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ан} \cdot W_{ка}; \quad (15)$$

$$F_{B\delta} = K_B \cdot n_{\delta} \cdot F_{\delta} = \frac{K_B \cdot n_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot \delta}{\mu_0}, \quad (16)$$

где  $I_{ан}$  – номинальный ток в обмотке якоря;  $W_{ка}$  – число витков катушки обмотки;  $K_B = (1.2 \dots 1.4)$  – коэффициент учёта МДС стали.

Значения  $K_a$  должно находиться в пределах  $(0.5 \dots 0.55)$  для обычных электротехнических сталей (например, ст. 2211 – 2411) и быть в пределах  $(0.6 \dots 0.65)$  для сталей с повышенной индукцией насыщения (например, ст. 49К2Ф, имеющая  $B_H = 2.2$  Тл).

Величина рабочего воздушного зазора во многом определяет эффективность работы ИЭМ. По технологическим условиям желательно выбирать воздушный зазор  $\delta$  минимальным. Но при увеличении  $\delta$  уменьшается переменная составляющая магнитного потока, ЭДС обмотки якоря и мощность ИЭМ.

Рекомендуемые выражения для предварительного выбора  $\delta$  в виде

$$\delta \geq 0.02 + \frac{\sqrt{D \cdot l}}{500} \text{ (см)} \text{ и } \delta = \left( \frac{1}{200} \dots \frac{1}{300} \right) \cdot D \quad (17)$$

определяют диапазон возможных значений  $\delta$  и не дают однозначного ответа. В (17)  $D, l$  – диаметр расточки и длина пакета якоря соответственно.

По техническим и технологическим характеристикам наибольшую вероятность для применения в авиации имеют одноименнополюсные двухпакетные аксиальные индукторные генераторы ( / 3 /, стр.161, рис. 6.2).

Применительно к подобным конструкциям значения числа витков в катушке обмотки якоря  $W_{ка}$  и индуктивного сопротивления фазы обмотки якоря  $X_a$  могут быть определены как

$$W_{ка} = \frac{U_{\phi p}}{4.44 \cdot f_H \cdot F_{\delta\delta} \cdot a_1 \cdot K_p \cdot n_{кф} \cdot n_{\Pi} \cdot K_w}; \quad (18)$$

$$X_a = 2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot a_0 \cdot W_{ка}^2 \cdot n_{кф}, \quad (19)$$

где  $U_{\phi p}$  – напряжение фазы обмотки якоря расчётное;  $F_{\delta\delta}$  – МДС эквивалентного воздушного зазора (10);  $a_0, a_1$  – постоянная и первая гармоника магнитной проводимости воздушного промежутка под полюсным выступом статора;  $K_p$  – число полюсных выступов, охватываемых катушкой обмотки якоря;  $n_{\Pi}$  – число пакетов статора с обмотками якоря;  $K_w$  – обмоточный коэффициент;  $f_H$  – номинальная частота тока якоря, причём

$$f_H = \frac{Z_r \cdot n_H}{60} \text{ (} n_H \text{ – номинальная частота вращения ротора)}.$$

Для трёхфазного ( $m = 3$ ) генератора с мостовым выпрямителем

$$I_{ан} = \frac{I_{дн}}{\sqrt{3}} = \frac{P_{дн}}{U_{дн} \cdot \sqrt{3}}; U_{\phi p} = \frac{U_{дп}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}}; K_v = \frac{U_{дп}}{U_{дн}} = 1.05 \dots 1.15, \quad (20)$$

где  $P_{дн}, U_{дн}$  – номинальные мощность и напряжение выпрямленного тока генератора;  $U_{\phi p}, U_{дп}$  – расчётные фазное и выпрямленное напряжения.

Учитывая выражения для  $F_{\delta\delta}$  (10),  $F_{\delta\delta}$  (16),  $W_{ка}$  (18),  $I_{ан}$  (20) и рекомендации по выбору значений  $K_a, K_B, K_v$ , можно для трёхфазного генератора с мостовым выпрямителем определить его воздушный зазор в соответствии с выражением

$$\delta = \frac{\mu_0}{B_{\delta}} \cdot \sqrt{\frac{K_v \cdot P_{дн}}{4.44 \cdot \sqrt{3} \cdot K_a \cdot K_B \cdot n_{\delta} \cdot f_H \cdot a_1 \cdot n_{кф} \cdot n_{\Pi} \cdot K_p \cdot K_w}}. \quad (21)$$

Для генератора без выпрямителя

$$I_{ан} = \frac{S_H}{3 \cdot U_{\phi н}}; K_u = \frac{U_{\phi p}}{U_{\phi н}} = 1.1 \dots 1.15, \quad (22)$$

где  $S_H, U_{\text{фн}}$  – номинальные полная мощность и фазное напряжение генератора, поэтому для них

$$\delta = \frac{\mu_0}{B_\delta} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot K_u \cdot S_H}{4.44 \cdot K_a \cdot K_b \cdot n_\delta \cdot f_H \cdot a_1 \cdot n_{\text{кф}} \cdot n_p \cdot K_p \cdot K_w}}, \quad (23)$$

Так, например, для проекта авиационного двухпакетного ( $n_p = 2$ ) аксиального генератора мощностью  $S_H = 40 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ , имеющего  $n_H = 8000 \text{ об/мин}$ ,  $Z_r = 20$ ,  $f_H = 2670 \text{ Гц}$ ,

$B_\delta = 1.6 \text{ Тл}$ ,  $n_\delta = 2$ ,  $n_{\text{кф}} = 4$ ,  $K_p = 1$ ,  $K_w = 1$ ,  $D = 172 \text{ мм}$ ,  $l = 50 \text{ мм}$ , выбранные значения

$K_a = 0.6$ ;  $K_b = 1.2$ ;  $K_u = 1.1$ , воздушный зазор:

а) в соответствии с (23) будет равен  $\delta = 0.8 \text{ мм}$ ;

б) в соответствии с (17) будет

$$\delta \leq 0.02 + \frac{\sqrt{D \cdot l}}{500} = 0.02 + \frac{\sqrt{17.2 \cdot 5}}{500} = 0.39 \text{ см} \approx 0.4 \text{ мм}$$

или находиться в диапазоне

$$\left(\frac{1}{200} \dots \frac{1}{300}\right) \cdot D = \left(\frac{1}{200} \dots \frac{1}{300}\right) \cdot 172 = (0.86 \dots 0.58) \text{ мм}.$$

### Литература

- [ 1 ] Серебряков А. Д. (1999) *Индукторные электрические машины с улучшенными техническими характеристиками*. РАУ, Рига, 108
- [ 2 ] Серебряков А. Д. (1995) Об эффективности применения индукторных машин в авиации, *Сборник научных трудов РАУ*, Рига, 45–53
- [ 3 ] Домбур Л. Э. (1984) *Аксиальные индукторные машины*. Зинатне. Рига, 250

Received on the 21<sup>st</sup> of February 2004